

Cartografía de combustible y potenciales de incendio en el continente africano utilizando FCCS

Pettinari, M.L.* , Chuvieco, E.

Grupo de Investigación de Teledetección Ambiental, Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá, Calle Colegios 2, 28801 – Alcalá de Henares, España.

Resumen: Este trabajo presenta la metodología utilizada para el desarrollo de un mapa de combustibles para el continente africano, utilizando el Sistema FCCS (*Fuel Characteristic Classification System*). La cartografía de los perfiles de combustible se basó en el uso de información cartográfica global obtenida mediante teledetección, y las variables asociadas se extrajeron de bases de datos de vegetación existentes. Se generaron un total de 75 perfiles de combustible, y a partir de las variables asignadas a cada uno se calcularon distintos Potenciales de Incendio utilizando valores de variables ambientales estándar. Estos potenciales permiten estimar el comportamiento del fuego de superficies, el fuego de copas, y la cantidad de combustible disponible, en función de las características de la vegetación existente.

Palabras clave: África, FCCS, perfiles de combustible, mapa de combustible.

Mapping of fuels and fire potentials in the African Continent using FCCS

Abstract: This paper presents the methodology used for the development of a fuel map for the African Continent, using FCCS (*Fuel Characteristic Classification System*). The cartography of the fuelbeds was based on global cartographic information obtained from remote sensing imaging, and the variables associated to each fuelbed were extracted from existing vegetation databases. A total of 75 fuelbeds were developed, and from the variables assigned to each of them, different Fire Potentials were calculated using default environmental variables. These potentials allow the estimation of surface fire behavior, crown fire and available fuel, depending on the characteristics of the existing vegetation.

Key words: Africa, FCCS, fuelbed, fuel map.

1. Introducción

Los incendios determinan variados e importantes impactos sobre el planeta. En algunas regiones, son un factor decisivo en los cambios de cobertura del suelo (Cochrane y Schulze, 1999; Nunes *et al.*, 2005), o plantean serios riesgos a la seguridad de la población y de sus bienes, cuando los mismos ocurren en las cercanías de áreas habitadas (Collins, 2005). En todos los casos, el fuego tiene consecuencias atmosféricas globales, afectando

el balance de energía y los ciclos biogeoquímicos (van der Werf *et al.*, 2010).

Una de las variables que influye en gran medida en el comportamiento y los efectos de los incendios forestales es la distribución y características de los combustibles presentes (Nunes, *et al.*, 2005). Por lo tanto, los mapas de combustible aportan valiosa información que puede ser utilizada para la estimación del riesgo de incendios (Burgan *et al.*, 1998; Chuvieco *et al.*, 2010), la planificación ante emergencias, o el cálculo de emisiones

* Autor para la correspondencia: mlucrecia.pettinari@uah.es

(Thonicke *et al.*, 2010). Los mapas de combustible deben incluir las características estructurales de la vegetación que están involucradas en el comportamiento del fuego y la emisión de gases de combustión (Xiao-rui *et al.*, 2005), de modo que permitan calcular estos parámetros utilizando modelos de combustible (Deeming *et al.*, 1972; Rothermel, 1983).

A nivel global, el Continente Africano, y en particular sus sabanas, son una de las regiones de la Tierra con mayor ocurrencia de incendios, debido a la confluencia de factores naturales y humanos (Trollope, 1996). Por un lado, la existencia de una estación lluviosa y otra seca permite el crecimiento y acumulación de biomasa durante la estación húmeda, que luego tiene alta probabilidad de ignición en los períodos de sequía, donde la humedad del combustible es baja (Andreae *et al.*, 1996). Además, en esta región son frecuentes las tormentas con ocurrencia de rayos, que actúan como fuente de ignición de los combustibles presentes (Komarek, 1972; Pettinari y Chuvieco, 2013). Complementariamente, las actividades humanas se han convertido en la principal fuente de ignición en la mayor parte del mundo, y eso incluye al continente africano, donde las prácticas tradicionales de cultivo y pastoreo incluyen quemaduras anuales o bianuales de vegetación de sabana (Andreae, *et al.*, 1996; Trollope y Trollope, 2010).

África es el continente con la mayor área quemada anual (van der Werf *et al.*, 2006), con una media de unas 240 Mha por año para el período 1997-2012 (Giglio *et al.*, 2013), y la mayor cantidad de emisiones gaseosas provenientes de incendios (Roberts y Wooster, 2008), llegando a contribuir con más del 50% de las emisiones de carbono globales (van der Werf, *et al.*, 2010). Esta situación ilustra la necesidad de estudiar en mayor detalle la vegetación africana en relación con su función como combustible ante los incendios.

Este trabajo presenta la metodología utilizada para el desarrollo de un mapa de combustibles para el Continente Africano, utilizando el Sistema de Clasificación de Características de los Combustibles (FCCS, *Fuel Characteristic Classification System*). Esta metodología presenta algunas mejoras respecto a la utilizada anteriormente para la elaboración de un mapa de combustibles para Sudamérica (Pettinari *et al.*, 2014).

El FCCS fue desarrollado por el Servicio Forestal de Estados Unidos (<http://www.fs.fed.us/pnw/fera/fccs/>, último acceso en enero 2015) a fin de mejorar la asignación de las cargas de combustibles existentes, incluyendo características de los combustibles presentes en distintos estratos: arbolado, matorral, pastos, combustibles muertos, hojarasca y materia orgánica del suelo (Ottmar *et al.*, 2007). Todas las características de los combustibles se combinan en los llamados “perfiles de combustible” (*fuelbeds*), que incluyen las variables físicas y químicas que son utilizadas en los modelos de combustible a fin de determinar el comportamiento del fuego (Riccardi *et al.*, 2007a).

2. Metodología

2.1. Generación del mapa de combustibles

La Figura 1 muestra en forma esquemática los distintos pasos seguidos para la creación del mapa de combustibles. Para ello se utilizó como base un mapa de cobertura del suelo, que describe el tipo de vegetación existente en cada píxel. La cobertura del suelo se extrajo del producto GlobCover V2.2, realizado a partir de imágenes MERIS del período Diciembre 2004 – Junio 2006 (Arino *et al.*, 2007). Este producto tiene una resolución espacial de 10 segundos de arco (correspondientes a unos 300 m en el Ecuador), y su leyenda está definida utilizando la clasificación propuesta por el Sistema de Clasificación de Cobertura del Suelo de las Naciones Unidas (Di Gregorio y Jansen, 1998).

Por otra parte, dado que los distintos tipos de vegetación se verán influidos por las condiciones climáticas existentes, se incluyeron en el análisis los distintos biomas presentes en el área de estudio. La delimitación de los biomas existentes se realizó a partir del mapa de biomas y ecorregiones de Olson (Olson *et al.*, 2001), el cual fue desarrollado para el *World Wildland Fund* (<http://worldwildlife.org/biomes>, último acceso en enero 2015). Este mapa incluye 14 biomas, los que a su vez están compuestos por más de 800 ecorregiones. El mapa original de biomas, de carácter vectorial, se rasterizó con la misma resolución espacial que el mapa de cobertura del suelo. A continuación se realizó

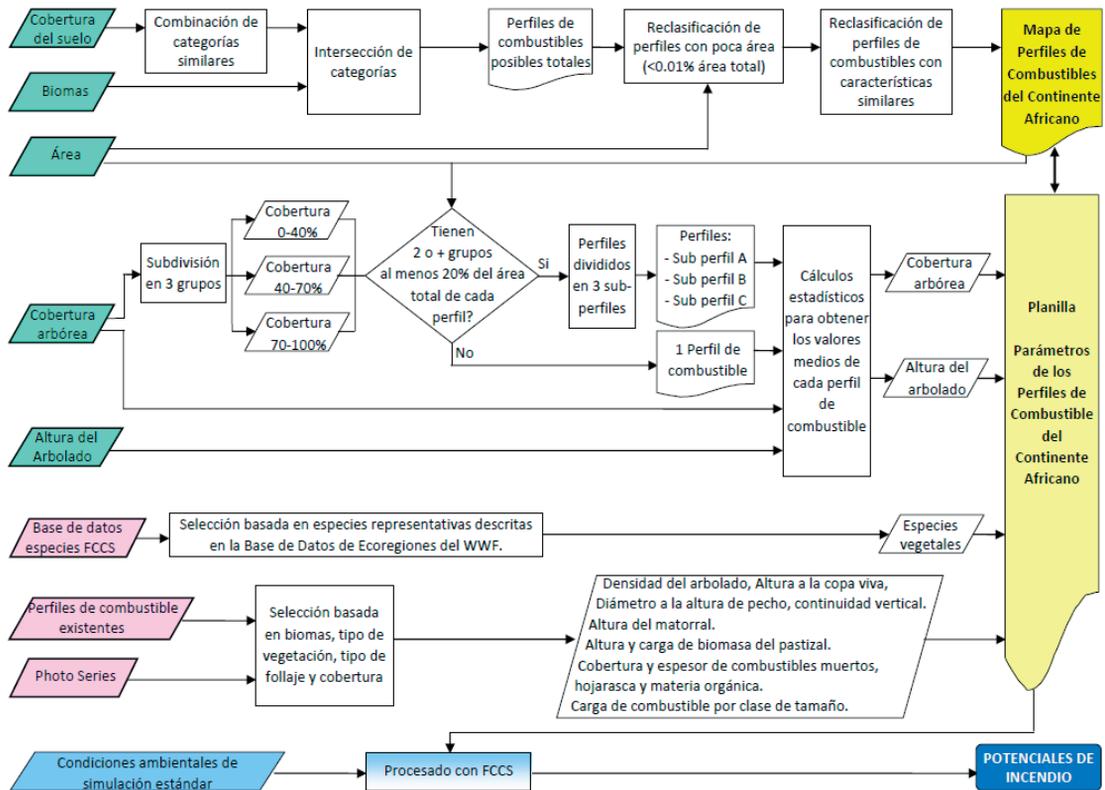


Figura 1. Esquema de la metodología utilizada.

el cruce de las distintas categorías de cobertura del suelo y de biomas para construir los perfiles de combustibles, y se agruparon aquellos que fueran muy similares (distintos tipos de cubiertas agrícolas, y coberturas del suelo diferenciadas únicamente por su proporción de cobertura arbórea). A su vez, se reclasificaron las combinaciones de cobertura-bioma que tuvieran poca representatividad (menos del 0,01% de la superficie total del continente) a aquellas que fueran más similares, a fin de disminuir el número total de combinaciones posibles.

Para poder valorar el riesgo de incendios de cada perfil de combustible, es necesario asignar a cada uno de ellos una lista de parámetros requeridos por FCCS (Riccardi *et al.*, 2007b) como datos de entrada para las fórmulas de cálculo de los potenciales. Para ello, y con el objeto de garantizar información consistente espacialmente, se utilizaron, siempre que fue posible, productos cartográficos existentes obtenidos a partir de teledetección.

El producto MODIS *Vegetation Continuous Field* (VCF), Collection 5 (Carroll *et al.*, 2011), se utilizó para calcular la proporción media de cobertura de arbolado para cada perfil de combustible. Este producto tiene una resolución espacial original de 250 m, y fue re-escalada a la resolución del mapa de cobertura del suelo.

En cuanto a la altura del arbolado, se utilizó el mapa global de altura de la vegetación elaborado por Simard *et al.* (2011), basado en datos Lidar obtenidos por el satélite ICESat, con una resolución espacial original de 1 km (que también fue re-escalada a la resolución del mapa de coberturas del suelo). Los valores de VCF se subdividieron en tres categorías: 0-40%, >40-70% y >70-100%, a fin de desagregar las áreas que tuvieran distintas proporciones de cobertura arbórea. Se calculó para cada perfil de combustible la proporción del área incluida en cada categoría de VCF. Aquellos perfiles donde dos o más categorías tuvieran al menos el 20% del área total del perfil cada una fueron subdivididos en sub-perfiles. El porcentaje de cobertura arbórea y la altura del arbolado de

cada perfil (o sub-perfil) se calcularon como el valor medio de cada variable, a fin de obtener un valor único para cada perfil de combustible, y estos resultados fueron incluidos como parte de los parámetros asignados a cada perfil.

Con el objeto de asignar las especies de arbolado, matorral y pastizal predominantes en cada perfil de combustible, se evaluaron las especies representativas de cada bioma. Para ello se utilizaron las descripciones de cada ecorregión existentes en la Base de Datos de Ecorregiones del *World Wildlife Fund* (<https://www.worldwildlife.org/biome-categories/terrestrial-ecoregions>, último acceso en enero 2015), que corresponden a las ecorregiones del mapa de Olson utilizado para este trabajo. A partir de las especies representativas de cada bioma, se asignó esa especie al perfil de combustible correspondiente, si la misma estuviera presente en la base de datos de especies del FCCS, o se asignó una especie lo más similar posible dentro de las existentes actualmente en esa base de datos, teniendo en cuenta el tipo de vegetación y de follaje.

El resto de las variables necesarias para cada perfil de combustible (altura de la base de copa, densidad de arbolado, diámetro a la altura de pecho, altura del matorral y del pastizal, proporción de combustibles vivos y muertos, cargas de combustibles muertos, etc. – ver listado completo de variables en la Figura 1) se asignaron utilizando como base los perfiles de combustible existentes en la base de datos del FCCS, utilizando valores medios de los perfiles existentes que tuvieran el mismo tipo de vegetación, y que se asemejaron lo más posible a las especies existentes en los perfiles de combustible generados para África. Complementariamente, se utilizó la información de carga y distribución de combustibles incluida en bases de datos (Photo Series) elaboradas para Brasil (Ottmar *et al.*, 2001) y México (Morfin-Ríos *et al.*, 2008). De esta forma se obtuvo, por un lado, un mapa de combustibles que contiene la información cartográfica de la localización de los distintos perfiles de combustibles presentes en el Continente Africano. Por otro lado, se obtuvo una planilla que incluye los parámetros asignados a cada perfil de combustible, y que son necesarios para las ecuaciones de cálculo de los potenciales de incendio de FCCS. Estos dos productos obtenidos pueden relacionarse entre sí a través del número que simboliza cada perfil de combustible.

2.2. Cálculo de los potenciales de incendios

Para poder estimar el comportamiento de fuego, además del combustible es necesario considerar otras variables, que corresponden a las condiciones ambientales presentes y a la topografía. Para el cálculo de los potenciales de incendio se utilizaron los valores por defecto que plantea FCCS, a fin de poder realizar comparaciones de los distintos perfiles de combustible con variables ambientales homogéneas.

El escenario propuesto para los cálculos fue el escenario D2L2 (Scott y Burgan, 2005), que corresponde a un contenido de humedad de combustibles muertos bajo, y a combustibles vivos con 2/3 de su vegetación seca. Este escenario contiene los siguientes parámetros de humedad: contenido porcentual de humedad para combustibles denominados de 1h (correspondientes a un diámetro de 1/4 de pulgada, o 6,35 mm): 6%; para combustibles de 10h (de 1/4 a 1 pulgada, es decir hasta 25,4 mm): 7%; para combustibles de 100h (diámetros de 1 a 3 pulgadas, es decir hasta 76,2 mm): 8%; contenido de humedad del pasto: 60%; del matorral: 90% y de copas: 90%. Las otras variables asignadas fueron: velocidad de viento, que corresponde a 6,44 km/h (4 millas/hora), y pendiente del terreno del 0%.

A partir de estos valores, junto con los parámetros de cada uno de los perfiles de combustibles incluidos en la planilla, FCCS calcula internamente dentro de su software los potenciales de incendio, utilizando una reformulación de los modelos de comportamiento del fuego de Rothermel (Sandberg *et al.*, 2007). Las fórmulas utilizadas por FCCS se encuentran descritas en la Documentación Técnica elaborada por Prichard *et al.* (2013).

Se calcularon los siguientes potenciales: Potencial de Comportamiento del Fuego de Superficie, Potencial de Fuego de Copas, y Potencial de Combustible Disponible, los cuales asumen valores adimensionales en un rango del 0 al 9. El Potencial de Comportamiento de Fuego de Superficie (PCFS) corresponde al máximo entre los valores calculados por FCCS del Potencial de Propagación del Fuego y el de Altura de Llama, que son proporcionales, a su vez, a la Velocidad de Propagación y la Altura de Llama. El Potencial

de Fuego de Copas (PFC) representa el potencial de que un fuego de superficie pueda trasladarse a las copas, ya sea incendiando un árbol individual, o convirtiéndose en un fuego activo de copas. Por último, el Potencial de Combustible Disponible (PCD) corresponde a una aproximación de la biomasa combustible bajo condiciones de humedad muy bajas, en tres fases de combustión: frente de llama, combustión sin llama y combustión residual (Prichard, *et al.*, 2013).

3. Resultados y discusión

3.1. Mapa de combustibles obtenido

La agrupación de categorías, cruce y reclasificación, dio como resultado la generación de 75 perfiles de combustibles (ver Figura 2). Cada uno de ellos está identificado con un número, cuyo valor de miles corresponde al bioma, y los tres valores posteriores corresponden a la cobertura del suelo en ese píxel. Por ejemplo, el perfil de combustibles 12130 corresponde a vegetación de Matorral (130) dentro del bioma de Bosques y Matorrales Mediterráneos (12). La leyenda de la Figura 2 muestra los códigos para cada bioma, cobertura de suelo, y perfiles de combustibles generados. Los códigos de los biomas corresponden a los originales del mapa de Olson *et al.* (2001), mientras que los códigos de la cobertura del suelo mantienen en general los códigos del Globcover V2.2, excepto en las categorías que fueron agrupadas. Las categorías agrupadas fueron: 11 y 14 se agruparon en la nueva categoría 15 que incluye todos los cultivos independientemente de su sistema de riego; 50 y 60 se agruparon en la categoría 61, que representa la vegetación de frondosas caducifolias; y las categorías 70 y 90 se agruparon en la nueva 91, que incluye la vegetación de coníferas con distintas proporciones de cobertura.

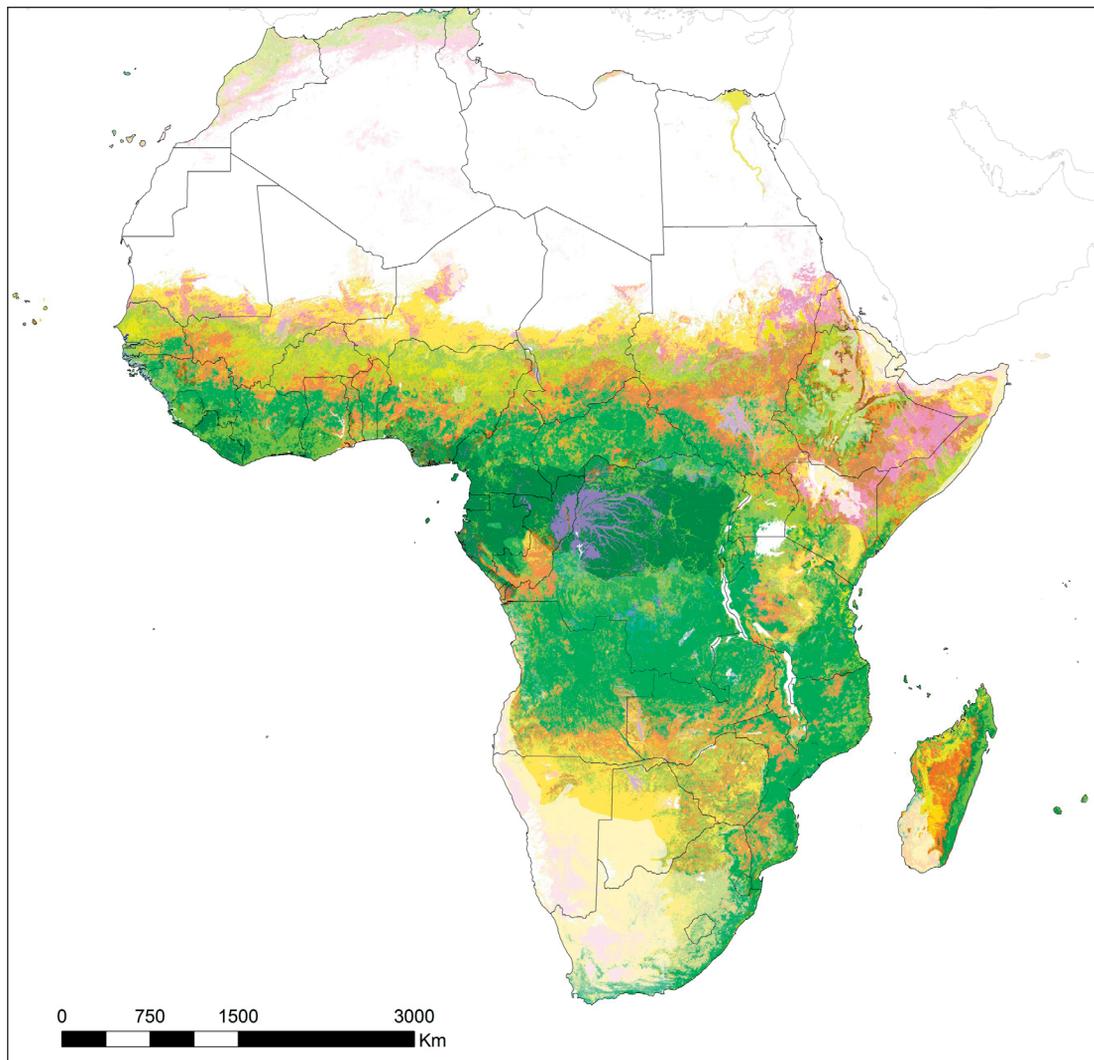
La subdivisión de los perfiles en función del área ocupada por cada categoría de VCF derivó en que 11 perfiles de combustible fueran sub-divididos. Dentro del bioma Bosque Húmedo de Frondosas Tropical/Subtropical (bioma 1) se subdividieron las coberturas del suelo correspondientes a Mosaico de Vegetación (50-70%) / Cultivos (20-50%) (perfil 1030), Bosque de frondosas perenne o semi-caducifolio (perfil 1040), y Bosque de frondosas regularmente inundado con agua dulce (perfil 1160).

En el bioma Bosque Seco de Frondosas Tropical/Subtropical (bioma 2) se subdividió la cobertura de Bosque de frondosas caducifolio (perfil 2061). En el bioma Pastizales, Sabanas y Matorrales Tropicales/Subtropicales (bioma 7) se subdividieron las coberturas correspondientes a Bosque de Coníferas (perfil 7091) y el perfil 7040. Respecto al bioma Pastizales y Matorrales de Montaña (bioma 10), en el mismo se subdividieron los perfiles 10040 y 10091. Por último, en el bioma Bosques y Matorrales Mediterráneos (bioma 12) se subdividieron los perfiles 12030, 12061 y 12091. Cabe aclarar que en la Figura 2 no se representan estos sub-perfiles.

Los perfiles de combustibles con mayor área se encuentran en el bioma de Pastizales, Sabanas y Matorrales Tropicales/Subtropicales, y corresponden en primer término a la vegetación de frondosas caducifolias (perfil 7061), con un total de 2,96 millones de km², seguido de los Matorrales (7130), y el Mosaico Vegetación/Cultivos (7030). A su vez, estos perfiles de combustibles corresponden geográficamente con las zonas de mayor ocurrencia de incendios a nivel global (Giglio, *et al.*, 2013), lo que muestra la importancia de estos tipos de vegetación en el estudio de la ocurrencia de incendios y comportamiento del fuego.

3.2. Cálculo de los Potenciales de Incendio

Se calcularon con el software de FCCS los tres potenciales de incendio descritos en la metodología para cada uno de los perfiles de combustible. Estos resultados se encuentran ilustrados en la Figura 3, donde cada píxel contiene el resultado de los potenciales correspondientes al perfil de combustible que tiene asignado. Estos potenciales son adimensionales, y están escalados de 0 a 9 a partir del valor máximo obtenido en la base de datos de perfiles de combustible incluida en el FCCS. El objetivo de estos potenciales es poder comparar el comportamiento de distintos perfiles de combustible entre sí. En este caso, dado que se utiliza para todo el continente africano el mismo conjunto de variables ambientales, los potenciales permiten comparar la vegetación existente únicamente teniendo en cuenta sus propiedades intrínsecas, y sin considerar otros factores que intervienen en el comportamiento del fuego, como el viento, el contenido de humedad o la pendiente.



Cobertura del suelo	Biomás							
	1 - Bosque húmedo de frondosas Trop/Subtrp.	2 - Bosque seco de frondosas Trop/Subtrp.	7 - Pastizales sabanas y matorrales Trop/Subtrp.	9 - Pastizales y matorrales inundados	10 - Pastizales y matorrales de montaña	12 - Bosques y matorrales mediterráneos	13 - Matorrales xéricos y desérticos	14 - Manglares
015 - Cultivos	1015		7015	9015	10015	12015	13015	14015
020 - Mosaico Cultivos (50-70%) / Vegetación (20-50%)	1020		7020	9020	10020	12020	13020	
030 - Mosaico Vegetación (50-70%) / Cultivos (20-50%)	1030	2030	7030	9030	10030	12030	13030	14030
040 - Bosque de frondosas perenne o semi-caducifolio	1040	2040	7040		10040			
061 - Bosque de frondosas caducifolio	1061	2061	7061	9061	10061	12061	13061	
091 - Bosque de coníferas	1091		7091		10091	12091		
100 - Bosque mixto	1100		7100	9100	10100			
110 - Mosaico Bosque-Matorral (50-70%) / Pastos (20-50%)	1110	2110	7110	9110	10110	12110	13110	
120 - Mosaico Pastos (50-70%) / Bosque-Matorral (20-50%)	1120	2120	7120	9120	10120		13120	
130 - Matorral	1130	2130	7130	9130	10130	12130	13130	
140 - Pastos	1140	2140	7140	9140	10140	12140	13140	
150 - Vegetación escasa			7150	9150	10150	12150	13150	
160 - Bosque de frondosas regulamente inundado (agua dulce)	1160							
170 - Bosque de frondosas y matorral inundado permanente (agua salada)								14170
180 - Pastos/Matorral inundados regularmente				9180				

Figura 2. Perfiles de combustible de África. Para la interpretación de los colores consultar edición digital, <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.2302>

La Figura 3.a muestra los resultados para el Potencial de Comportamiento de Fuego de Superficie (PCFS). En esta figura se observa que los perfiles de combustible con mayor PCFS (correspondiente al valor máximo de 9) corresponden a los pastizales (perfiles de combustible con cobertura del suelo 140), a los cultivos de arroz (perfiles 14015 y 14020), los matorrales (12130, 13130), y los pastizales y matorrales inundables (9180), debido a la alta velocidad de propagación que presenta este tipo de vegetación. Por el contrario, el menor valor de PCFS (1,98) se obtuvo para el perfil de combustible 1110, correspondiente al perfil de Mosaico Bosque-Matorral (50-70%) / Pastos (20-50%) en un bioma de Bosque Húmedo de Frondosas. Esto se debe a que el combustible para un fuego superficial predominante corresponde a hojarasca de especies vegetales no inflamables, lo que genera valores bajos de Potencial de Altura de Llama y Potencial de Propagación del Fuego. Las áreas semi-desérticas (perfil 13150), como es el caso del Desierto del Sahara, y del Desierto de Namib (y su continuación en Angola y Sudáfrica), presentan valores de PCFS intermedio. Esto se debe a que, aunque poseen escasa cobertura vegetal y poco combustible disponible (ver Figura 3.c), la vegetación que poseen es fácilmente inflamable, y eso hace que en el caso de un incendio los valores de Velocidad de Propagación sean lo suficientemente altos como para generar esos valores finales de PCFS.

La Figura 3.b muestra el Potencial de Fuego de Copas (PFC). En esta figura se observa que el bioma 1, de Bosque Húmedo de Frondosas, ubicado mayoritariamente en las selvas tropicales ecuatoriales, posee un PFC de 0. Esto se debe a que este bioma tiene asignadas especies vegetales arbóreas frondosas perennifolias, que son catalogadas como neutrales ante el fuego en FCCS (no contribuyen con energía a la combustión), y por lo tanto FCCS considera que esas especies vegetales no tienen potencial de generar fuegos de copas (Prichard, *et al.*, 2013). Por el contrario, el bioma que lo rodea, correspondiente a Pastizales, Sabanas y Matorrales (bioma 7) sí incluye especies catalogadas como inflamables por FCCS, y por lo tanto presentan valores de PFC positivos. Estos potenciales tienen su máximo en el perfil de combustible 7040c (bosque de frondosas perenne o semi-caducifolio en el bioma 7, dentro del sub-perfil con más del 70% de cobertura arbórea), donde tiene un PFC de 6,16.

Le sigue el perfil 2040, correspondiente a un bioma de bosque seco de frondosas, ubicado mayoritariamente en Madagascar, con un valor de PFC de 5,34. La mayor parte de las áreas con Potencial de Fuego de Copas están ubicadas en los biomas 7 y 12, pero debido a la dispersión de los píxeles de cobertura del suelo con bosques, no se llegan a observar en la escala del mapa de la Figura 3.b.

Por último, la Figura 3.c muestra los resultados del cálculo del Potencial de Combustible Disponible (PCD). Para este potencial se aplica la misma regla que para el PFC, es decir que se considera que aportan más combustibles aquellas especies vegetales que contribuyan con energía a la combustión (especies clasificadas como inflamables), y por este motivo las zonas boscosas ubicadas en el bioma 7 (perfil 7040c) tienen un valor de PCD (6,75) mayor que el que se obtiene en el bioma 1 (perfil 1040c, con PCD=3,91). El menor valor, correspondiente a un PCD de 0.01, se encuentra en las zonas desérticas, con cobertura vegetal de pastizal, o con escasa vegetación (perfiles de combustible 13140 y 13150).

El hecho de subdividir los perfiles de combustibles en función de su porcentaje de cobertura arbórea constituyó una mejora respecto de la metodología utilizada para la generación del mapa de combustibles para Sudamérica (Pettinari, *et al.*, 2014). Esto permitió incluir mayor variabilidad dentro de los distintos perfiles, y obtener resultados más desagregados y realistas de los distintos Potenciales de Incendio posibles. De otro modo, los aportes de los bosques tropicales con cobertura arbórea mayor al 70% (por ejemplo 1040c ó 7040c) hubieran quedado enmascarados al estar incluidos en un perfil de combustible con una cobertura arbórea intermedia.

Pero aun así, el hecho de utilizar valores estándar de variables ambientales en todo el terreno, aunque permite comparar los distintos perfiles de combustible entre sí en base a sus características intrínsecas, hace que los valores obtenidos de variables de comportamiento del fuego en algunos casos no sean posibles en la realidad, sobre todo en biomas húmedos, donde no se encontrarían humedades de combustibles tan bajas como las utilizadas para la generación de estos mapas. Por lo tanto, las líneas futuras de investigación incluirán la incorporación de variables topográficas y climáticas, a fin de generar resultados de Potenciales de Incendio más acordes a los que podrían encontrarse en la

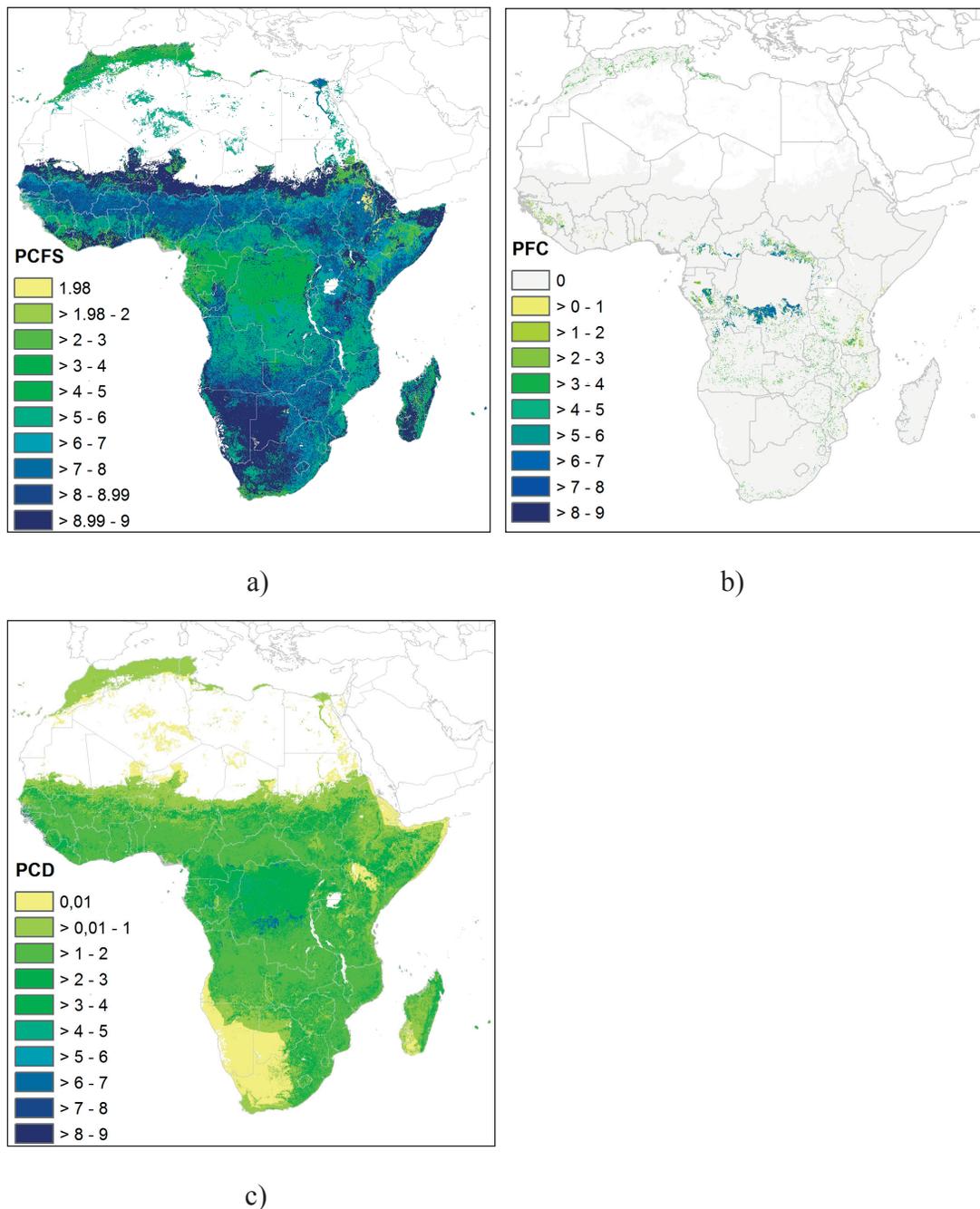


Figura 3. Resultados de los Potenciales de Incendio calculados mediante FCCS (valores adimensionales). a) Potencial de Comportamiento del Fuego de Superficie. b) Potencial de Fuego de Copas. c) Potencial de Combustible Disponible. Para la interpretación de los colores consultar edición digital, <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.2302>

realidad. Esto permitirá, a su vez, integrar los resultados obtenidos a otros sistemas, como Consume (Prichard *et al.*, 2005), a fin de realizar una estimación de las emisiones que pueden generar los distintos perfiles.

4. Conclusiones

Este trabajo presenta la metodología utilizada para la elaboración de un mapa de combustibles para el continente africano utilizando el Sistema de Clasificación de Características de

los Combustibles (FCCS). El mapa generado incluye 75 perfiles de combustibles, 11 de los cuales se encuentran sub-divididos en función de su proporción de cobertura arbórea. El cálculo de los Potenciales de Incendio se realizó utilizando condiciones ambientales estándar, por lo que se obtuvieron resultados que dependen únicamente de las propiedades físico-químicas de la vegetación de los distintos perfiles. La continuación de este trabajo incluirá la incorporación de variables climáticas y topográficas, a fin de obtener valores de Potenciales de Incendio más realistas.

Agradecimientos

El Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España ha financiado a M. Lucrecia Pettinari dentro del Programa de Formación de Profesorado Universitario. Los autores agradecen a Susan Prichard, Anne Andreu y Roger Ottmar por su colaboración para la utilización del FCCS.

Referencias

- Andreae, M.O., Atlas, E.H.C., Cofer, III W.R., Harris, G.W., Helas, G., Koppmann, R., Lacaux, J., Ward, D. 1996. Trace gas and aerosol emissions from savanna fires. En: J. C. Levine (Ed.), *Biomass Burning and Global Change* (Vol. I, pp. 278-295). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Arino, O., Gross, D., Ranera, F., Bourg, L., Leroy, M., Bicheron, P., Latham, J., Di Gregorio, A., Brockman, C., Witt, R., Defourny, P., Vancutsem, C., Herold, M., Sambale, J., Achard, F., Durieux, L., Plummer, S., Weber, J.L. 2007. GlobCover: ESA service for global land cover from MERIS. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International*, Barcelona, Spain, pp. 2412-2415.
- Burgan, R. E., Klaver, R. W., Klaver, J. M., 1998. Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. *International Journal of Wildland Fire*, 8(3), 159-170. <http://dx.doi.org/10.1071/WF9980159>
- Carroll, M., Townshend, J., Hansen, M., DiMiceli, C., Sohlberg, R., Wurster, K. 2011. MODIS Vegetative Cover Conversion and Vegetation Continuous Field. En: B. Ramachandran, C. O. Justice & M. J. Abrams (Eds.), *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*. New York: Springer, pp. 725-745.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M. P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J. R., Herrera, M. A., Zamora, R. 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 221(1), 46-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>
- Cochrane, M. A., Schulze, M. D. 1999. Fire as a recurrent event in tropical forests of the Eastern Amazon: effects on forest structure, biomass, and species composition. *Biotropica*, 31(1), 2-16. <http://dx.doi.org/10.2307/2663955>
- Collins, T. W. 2005. Households, forests, and fire hazard vulnerability in the American West: A case study of a California community. *Environmental Hazards*, 6(1), 23-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hazards.2004.12.003>
- Deeming, J. E., Lancaster, J. W. Fosberg, M. A., Furman, W. R., Schroeder, M. J., 1972. The National Fire-Danger Rating System (Research Paper RM-84). Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station.
- Di Gregorio, A., Jansen, L. J. M. 1998. Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual (GCP/RAF/287/ITA Africover - East Africa Project and Soil Resources, Management and Conservation Service). Rome: Environment and Natural Resources Service.
- Giglio, L., Randerson, J. T., van der Werf, G. R. 2013. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(1), 317-328. <http://dx.doi.org/10.1002/jgrg.20042>
- Komarek, E. V. 1972. Lightning and fire ecology in Africa. En: *11th Annual Tall Timber Fire Ecology Conference: fire in Africa*, Tallahassee, FL., 473-511.
- Morfín-Ríos, J. E., Alvarado-Celestino, E., Jardel-Peláez, E. J., Vihnanek, R. E., Wright, D. K., Michel-Fuentes, J. M., Wright, C. S., Ottmar, R. D., Sandberg, D. V., Nájera-Díaz, A. 2008. Photo series for quantifying forest fuels in Mexico: montane subtropical forests of the Sierra Madre del Sur and temperate forests and montane shrubland of the northern Sierra Madre Oriental. Seattle: *Pacific Wildland Fire Sciences Laboratory Special Pub. N° 1*; University of Washington, College of Forest Resources.
- Nunes, M. C. S., Vasconcelos, M. J., Pereira, J. M. C., Dasgupta, N., Alldredge, R. J., Rego, F. C. 2005. Land cover type and fire in Portugal: do fires burn land cover selectively? *Landscape Ecology*, 20(6), 661-673. <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-005-0070-8>

- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., Kassem, K. R. 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*, 51(11), 933-938. [http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)
- Ottmar, R. D., Sandberg, D. V., Riccardi, C. L., Prichard, S. J. 2007. An overview of the Fuel Characteristic Classification System - Quantifying, classifying, and creating fuelbeds for resource planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(12), 2383-2393. <http://dx.doi.org/10.1139/X07-077>
- Ottmar, R. D., Vihnanek, R. E., Miranda, H. S., Sato, M. N., Andrade, S. M. A. 2001. Stereo Photo series for quantifying cerrado fuels in Central Brazil - Volume I (General Technical Report PNW-GTR-519). Seattle: Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service.
- Pettinari, M. L., Chuvieco, E., 2013. Association between fire causative agents within land cover types and global fire occurrence. En: J. M. Krisp, L. Meng, R. Pail & U. Stilla (Eds.), *Earth Observation of Global Changes (EOGC)*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 269-283. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32714-8_18
- Pettinari, M. L., Ottmar, R. D., Prichard, S. J., Andreu, A. G., Chuvieco, E. 2014. Development and mapping of fuel characteristics and associated fire potentials for South America. *International Journal of Wildland Fire*, 23(5), 643-654. <http://dx.doi.org/10.1071/WF12137>
- Prichard, S. J., Ottmar, R. D., Anderson, G. K. 2005. Consume 3.0 User's Guide. Seattle, WA: USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station. http://www.fs.fed.us/pnw/fera/research/smoke/consume/consume30_users_guide.pdf
- Prichard, S. J., Sandberg, D. V., Ottmar, R. D., Eberhardt, E., Andreu, A. G., Eagle, P., Swedin, K. 2013. Fuel Characteristic Classification System Version 3.0: Technical Documentation (General Technical Report PNW-GTR-887). Portland, OR: USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Riccardi, C. L., Ottmar, R. D., Sandberg, D. V., Andreu, A., Elman, E., Kopper, K., Long, J. 2007a. The fuelbed: a key element of the Fuel Characteristic Classification System. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(12), 2394-2412. <http://dx.doi.org/10.1139/X07-143>
- Riccardi, C. L., Prichard, S. J., Sandberg, D. V., Ottmar, R. D. 2007b. Quantifying physical characteristics of wildland fuels using the Fuel Characteristic Classification System. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(12), 2413-2420. <http://dx.doi.org/10.1139/X07-175>
- Roberts, G. J., Wooster, M. J. 2008. Fire detection and fire characterization over Africa using Meteosat SEVIRI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(4), 1200-1218. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2008.915751>
- Rothermel, R. C. 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires (INT-143): US Department of Agriculture - Forest Service.
- Sandberg, D. V., Riccardi, C. L., Schaaf, M. D. 2007. Reformulation of Rothermel's wildland fire behaviour model for heterogeneous fuelbeds. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(12), 2438-2455. <http://dx.doi.org/10.1139/X07-094>
- Scott, J. H., Burgan, R. E. 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's Surface Fire Spread Model (RMRS-GTR-153). Fort Collins, CO: USDA Forest Service.
- Simard, M., Pinto, N., Fisher, J. B., Baccini, A. 2011. Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research*, 116(G04021), 12 pp.
- Thonicke, K., Spessa, A., Prentice, I. C., Harrison, S. P., Dong, L., Carmona-Moreno, C. 2010. The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: results from a process-based model. *Biogeosciences*, 7, 1991-2011. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-7-1991-2010>
- Trollope, W. S. W. 1996. Biomass burning in the Savannas of Southern Africa with particular reference to the Kruger National Park in South Africa. En J. C. Levine (Ed.), *Biomass burning and Global Change*. Cambridge, Mass.: MIT Press, Vol. I, pp. 260-269.
- Trollope, W. S. W., Trollope, L. A. 2010. Fire effects and management in African grasslands and savannas. En: V. R. Squires (Ed.), *Range and Animal Sciences and Resources Management*, Vol. II, pp. 121-145, EOLSS.
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Kasibhatla, P. S., Arellano, Jr. A. F., 2006. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3423-3441. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-6-3423-2006>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., Morton, D. C., DeFries, R. S., Jin, Y., van Leeuwen, T. T. 2010. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11707-11735. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-10-11707-2010>
- Xiao-rui, T., McRae, D. J., Li-fu, S., Ming-yu, W. 2005. Fuel classification and mapping from satellite images. *Journal of Forestry Research*, 16(4), 311-316. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02858198>